

## 상용 TiO<sub>2</sub>의 지하수 비소제거 특성에 관한 연구

이동호 · 김성수<sup>\*,†</sup>

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과

<sup>\*</sup>경기대학교 환경에너지공학과

## A Study on the Arsenic Removal Characteristics of TiO<sub>2</sub> Powders in Ground Water

Dong Ho Lee · Sung Su Kim<sup>\*,†</sup>

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate of School Kyonggi University

<sup>\*</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

(Received 17 September 2015, Revised 1 October 2015, Accepted 1 October 2015)

### Abstract

This study aims to evaluate arsenic adsorption efficiencies over various metal oxides (CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZrO<sub>2</sub>, AlOOH, SiO<sub>2</sub>,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and investigate the correlation between physico-chemical characteristics of metal oxides and their efficiencies. From XPS, XRD BET analysis and isotherm adsorption test, TiO<sub>2</sub> powder showed that the best adsorption efficiency, and it's mechanism was highly depended on the chemical adsorption.

**Key words** : Adsorption, Arsenic, Magnetite, Metallic oxide, Titania

### 1. Introduction

비소는 자연계에서 반금속 물질로 구분되고 때론 금속물질로 전환되기도 한다. 비소는 대개 자연환경에서 산소, 염소, 황과 같은 원소와 결합된 상태로 존재하며(Jeon et al., 2008), 이러한 형태의 비소를 무기 비소라고 한다. 무기 비소 화합물은 산업폐수와 화학적 합금, 살충제, 화석연료의 연소, 채광 작업 등 다양한 경로를 통해 자연과 인간에게 노출된다(ATSDR, 2007). 특히 지하수 내 존재하는 비소는 인간에게 만성적으로 폐, 방광, 피부 등에 암을 일으키는 발암성과 피부병, 신경독성 등을 일으키는 비발암성이 있는 매우 독성이 큰 중금속으로 알려져 있다(Fields et al., 2000; WHO, 2000).

국내의 경우, 전남과 울산지역에서 10 µg/L 이상의 비소가 지하수에서 검출되었으며(Ahn et al., 2005), 환경부에서 전국 700 개소의 지하수를 하절기 및 동절기에 각각 분석한 결과, 비소농도가 10 µg/L 이상 검출되는 지역이 상당한 것으로 확인되었다(MOE, 2005).

지하수 내 포함된 비소를 제거하기 위해 가장 널리 사용되는 방법은 다양한 금속산화물을 이용한 흡착방법이다. 수

용액 상 비소는 As(III), As(V)로 존재하고 있으며, 그 형태는 As(III)의 경우 H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub><sup>0</sup>, H<sub>2</sub>AsO<sub>3</sub><sup>-</sup>로, As(V)는 H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 등 산화음이온 또는 중성의 상태로 존재한다. 비소의 흡착은 흡착제의 비표면적에 크게 의존하는 흡착반응의 기본적인 특성과 부합하여 흡착제의 나노화 또는 비표면적 증가 연구에 집중되어 왔다. 또한 금속산화물의 경우 magnetite, 철 산화물을 이용한 연구가 주를 이루고 있으며, TiO<sub>2</sub>에 관한 연구는 미비한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 비소 흡착 담체의 소재가 되고 있는 다양한 금속산화물을 이용하여 비소흡착 제거효율을 평가하고, 금속산화물 중 상용화된 TiO<sub>2</sub>의 종류별 물리·화학적 특성 및 비소제거 특성을 평가하고자 하였다.

### 2. Materials and Methods

#### 2.1. 금속산화물 종류별 비소흡착 효율 평가

비소를 흡착으로 제거하기 위해 다양한 금속산화물을 이용하여 비소흡착 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 금속산화물은 현재 비소제거를 위한 흡착제로 가장 많이 사용되고 있는 물질을 선정하였으며, 분말형태로 이루어진 Ceria (CeO<sub>2</sub>, Sigma Aldrich, CAS No. 1306-38-3), Titania (TiO<sub>2</sub>, Degussa, CAS No. 13463-67-7), Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 합성물질), Zirconia (ZrO<sub>2</sub>, Sigma Aldrich, CAS No. 1314-23-4), Boehmite (AlOOH, Osang Jaiel, CAS No. 1318-23-6), Silica (SiO<sub>2</sub>, Sigma Aldrich, CAS No. 60676-86-0),  $\alpha$ -phase alumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Alfa Aesar, CAS No. 1344-28-1),  $\gamma$ -phase

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

sskim@kyonggi.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

alumina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Alfa Aesar, CAS No. 1344-28-1)을 이용하였다. 비소흡착 효율 평가는 금속산화물 주입량을 변화하여 알아보았으며, 교반온도 20°C, 교반속도 60 RPM, 교반시간은 50 hr으로 고정하였다. 비소 흡착실험에 사용된 원수는 아비산나트륨(KH<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub>, 99.9%, Sigma Aldrich)을 이용하여 제조하였고, pH 범위는 7.0~7.5 사이로 초기 비소 농도를 0.2 mg/L로 설정하였다.

### 2.2. 등온흡착식

일반적으로 흡착반응식 중 Langmuir 및 Freundlich 등온흡착식을 이용할 경우 흡착제의 흡착능은 물론 등온식의 매개변수의 값으로부터 흡착제의 공정 적용시 나타낼 수 있는 효과와 흡착제의 적용 가능성을 수치적으로 간단하게 평가할 수 있다(Won and Lee, 2007). 따라서 본 실험에 사용된 흡착제인 금속산화물에 흡착질인 As(III)가 흡착되는 과정을 파악하기 위해 Langmuir isotherm과 Freundlich isotherm을 적용하였다. 여기서 C<sub>e</sub>는 액체의 평형농도(mg/L), q<sub>e</sub>는 평형에 도달한 흡착량(mg/g), q<sub>m</sub>은 흡착제의 최대 흡착량을 나타낸다.

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (1) \text{ Langmuir isotherm}$$

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2) \text{ Freundlich isotherm}$$

### 2.3. 금속산화물 종류별 물리·화학적 특성 비교

금속산화물의 종류별 물리·화학적 흡착을 평가하기 위해 촉매의 비표면적 및 pore size 분석을 실시하였다. 촉매의 비표면적 측정에는 Micromeritics Co.의 ASAP 2010C 분석장치를 사용하였으며, BET (Brunauer Emmett Teller)식을 이용하였다. 또한 pore size는 Kelvin식을 통해 유체의 meniscus의 평균반경과 상대압력에서의 흡착층의 두께를 이용하여 세공의 크기를 계산하는 방법인 BJH (Barrett Joyer Hanlenda) 법에 의해 도출하였다. 각각의 시료는 300°C에서 2시간 동안 진공상태로 가스를 제거한 후 분석하였다.

XRD 분석은 PANalytical Co.의 X'Pert PRO MRD을 이용하여 Radiation source로는 Cu K $\alpha$ ( $\lambda$  = 1.5056 Å)가 사용되었으며, XPS의 경우 Thermo 사의 Alpha-K를 이용하여 Ti, O, C 원소를 wide scanning spectrum으로 분석하여 binding energy와 intensity를 확인하였다.

### 2.4. 비소분석방법

비소의 분석은 디에틸 디티오 카르바민산은법(Silver diethyl dithiocarbamate, SDDC method)에 의해 분석하였다(Yoo et

al., 2015). 시료는 염산(HCl), 오요드화칼륨(KI) 및 이염화주석(SnCl<sub>2</sub>)을 주입하여 수분간 방치하였으며, 비소발생 장치에 사용된 유리섬유는 아세트산 납(Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>)에 담긴 후 건조시켜 사용하였다. 준비된 시료에 아연분말을 넣고 반응시킨 후 다이에틸 디티오카르바민산은 용액에 발생된 가스를 포집하였으며, 용해시킨 흡수용액을 UV Spectrometer를 이용하여 520 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. 금속산화물 종류별 주입량 변화에 따른 비소흡착 효율

금속산화물을 이용하여 동일한 실험조건에서 비소흡착 효율을 비교하였으며 금속산화물 주입량 변화에 따른 실험결과를 Table 1 및 Fig. 1에 나타내었다. 금속산화물 주입량을 각각 동일하게 1 g씩 주입하였을 경우 CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>는 비소가 모두 흡착되어 제거된 것으로 나타났다. 또한 ZrO<sub>2</sub> 역시 97%의 높은 흡착 제거율을 보였다(Fig. 1(a)). 이외의 다른 금속산화물의 경우 CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZrO<sub>2</sub>에 비해 상대적으로 흡착 효율이 낮은 것으로 분석되었다. 금속산화물 1 g 주입 실험에서 CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 비소 흡착이 모두 이루어짐에 따라 금속산화물에 대한 비소 부하량을 증가하여 추가로 비소흡착 효율을 비교하였다(Fig. 1(b)). 금속산화물 주입량을 0.125 g로 주입하였을 경우 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>만 비소가 모두 흡착되었으며, TiO<sub>2</sub>도 99%의 매우 높은 흡착 효율을 나타내었다. 또한 CeO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub> 금속산화물은 각각 92, 68%의 비소흡착 효율을 확인하였다.

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>과 TiO<sub>2</sub> 금속산화물 주입량을 0.01 g로 달리하여 비소흡착 효율을 비교한 결과 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>과 TiO<sub>2</sub> 금속산화물에서 고 효율의 비소흡착 효율을 보이는 것으로 확인하였다. Fig. 1(c)에 나타난 바와 같이 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>는 1.972 mg/g, TiO<sub>2</sub>는 2.425 mg/g의 흡착량을 보였으며, 각각 66%, 69%의 비소흡착

**Table 2.** Arsenic adsorption of various types of metal oxides at different dosages

Parameter	Adsorption (mg/g)		
	Dosage (1 g)	Dosage (0.125 g)	Dosage (0.01 g)
CeO <sub>2</sub>	0.0374	0.259	-
TiO <sub>2</sub>	0.0374	0.284	2.769
ZrO <sub>2</sub>	0.0374	0.193	-
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0223	-	-
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0271	-	-
SiO <sub>2</sub>	0.0005	-	-
AlOOH	0.0346	-	-
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.0374	0.285	2.425

**Table 1.** Experimental conditions of arsenic adsorption

Parameter	Unit
Metallic oxide (notation)	CeO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , AlOOH, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Dosage, g	1, 0.125, 0.01

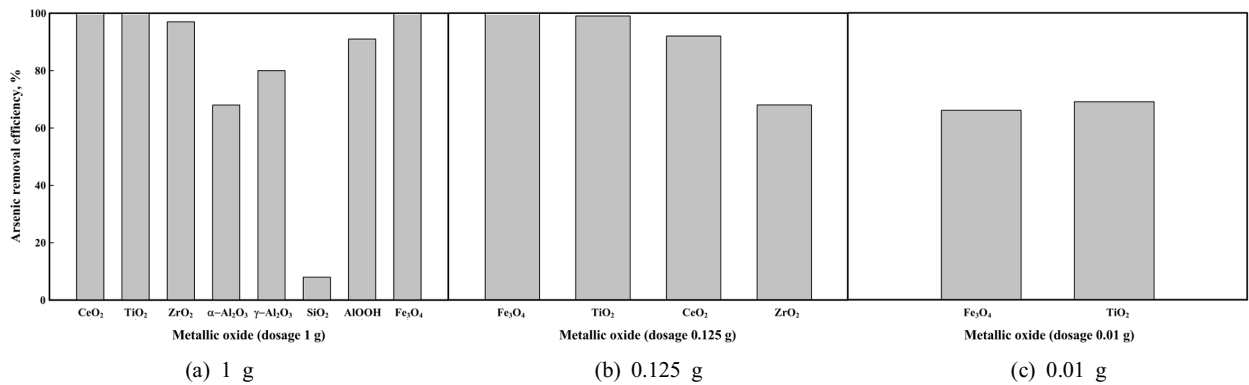


Fig. 1. Results of arsenic adsorption efficiencies with metallic oxide (As concentration 0.2 mg/L; reaction time 50 hr).

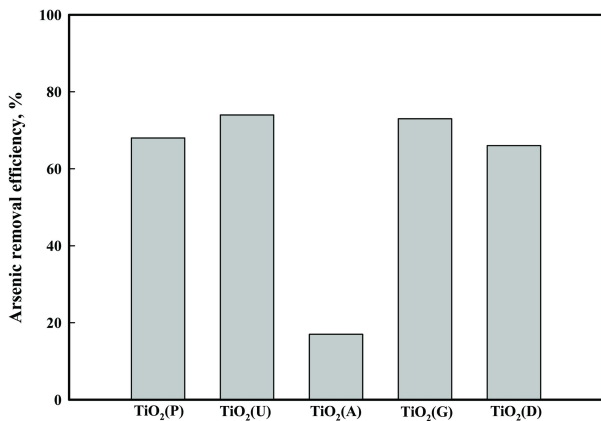


Fig. 2. Results of arsenic adsorption efficiencies with type of TiO<sub>2</sub> (As concentration 0.2 mg/L; dosage 0.01 g; reaction time 50 hr).

효율로 TiO<sub>2</sub>가 좀 더 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 비소는 수중에서 대부분 음이온의 형태로 존재하기 때문에 금속산화물과의 상호작용에 있어서 산화물 표면의 전위가 흡착에 있어서 가장 중요한 역할을 나타내는 것으로 알려져 있다. Kosmulski (2009)에 따르면 금속산화물의 Point of zero charge는 TiO<sub>2</sub> 5.5~6.4, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 6.5~6.6, AlOOH 8.1~9.7, α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8.5~8.9, γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9.0으로 보고되고 있으며, 비교적 영전위점이 낮은 TiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 금속산화물이 비소 흡착이 훨씬 유리하게 나타나는 것으로 상관성을 확인하였다. TiO<sub>2</sub>는 안료, 광촉매, 촉매의 지지체, 흡착제 등 다양한 용도에 의해 많은 제품이 상용화되어 있으나 제조사별 물리화학적 특성이 상이하야 각 용도에서 최적의 성능을 나타내는 제품들이 다른 것으로 널리 알려져 있다. 이에 따라 앞선 실험결과를 토대로 비소흡착 효율이 가장 우수한 TiO<sub>2</sub>의 상용화 된 종류별 비소흡착 효율을 평가하였으며, 그 결과를 Table 3 및 Fig. 2에 나타내었다. 실험결과 상용 TiO<sub>2</sub> 중 Sigma aldrich사의 TiO<sub>2</sub>를 제외한 나머지 TiO<sub>2</sub>가

모두 65% 이상의 비소흡착 효율을 나타내었으며, 흡착량을 평가한 결과 Hombikat사의 TiO<sub>2</sub>가 2.15 mg/g로 가장 높은 비소 흡착량을 보였다.

3.2. TiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 금속산화물의 등온흡착 특성 도출

TiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 금속산화물의 등온흡착식을 도출한 결과를 Table 3~4에 나타내었다. TiO<sub>2</sub> (Degussa, P-25) 및 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (합성물질) 금속산화물 주입량을 각각 0.01, 0.02, 0.03, 0.05 g으로 주입하였으며, 초기 비소 농도는 0.2 mg/L로 설정하여 실험을 진행하였다. Freundlich 흡착모델을 비교한 결과, 이온결합 강도를 나타내는 1/n값은 TiO<sub>2</sub>가 0.797, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>는 0.736으로 이온결합 강도가 불안정한 것으로 나타났다. 일반적으로 이온결합 강도는 0.1~0.5 범위에서 안정적이라고 알려져 있다(Weber and Miller, 1989). 또한 TiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 주입량별 최대 흡착량은 각각 2.680~0.186 mg/g, 1.973~0.550 mg/g으로 나타났다. 산화철 코팅 모래를 이용한 비소흡착을 평가한 연구에서 Freundlich 흡착모델을 적용한 결과 최대 흡착량은 0.167, 0.206 mg/g로 산화철 코팅 모래 kg당 90 mg의 비소가 제거되었다고 보고하고 있으며(Yang et al., 2003), 본 연구의 연구결과와 유사한 흡착량을 나타내었다.

또한 Langmuir 흡착모델의 적합성을 알아보기 위해 분리인자 R<sub>L</sub>값을 분석하였다. R<sub>L</sub>식에서 C<sub>0</sub>는 흡착질의 초기농도, b는 흡착속도를 나타내며, 무차원상수로 나타낼 수 있다.

$$R_L = 1 / (1 + (1 + bC_0)) \tag{3} \text{ 분리인자}$$

분리인자 값은 1/(1+(1+bC<sub>0</sub>)) 식 (Dada et al., 2012; Lee, 2014)에 의해 도출하였으며, 그 결과 0.460 및 0.285로 TiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>는 Langmuir 흡착모델의 적용이 적합한 나타났다. Weber and Chakravorti (1974)의 연구에서 R<sub>L</sub>값의 경우 R<sub>L</sub>>1, R<sub>L</sub>=0은 부적합, 0<R<sub>L</sub><1은 적합하다고 알려져 있다.

Table 3. Arsenic adsorption of various commercial TiO<sub>2</sub> powers

Parameter	TiO <sub>2</sub> (P) <sup>1)</sup>	TiO <sub>2</sub> (U) <sup>2)</sup>	TiO <sub>2</sub> (A) <sup>3)</sup>	TiO <sub>2</sub> (G) <sup>4)</sup>	TiO <sub>2</sub> (D) <sup>5)</sup>
Adsorption (mg/g)	1.97	2.15	0.47	1.74	1.97

<sup>1)</sup> TiO<sub>2</sub>(P): P-25 (Degussa)

<sup>2)</sup> TiO<sub>2</sub>(U): UV100 (Hombikat)

<sup>3)</sup> TiO<sub>2</sub>(A): Anatase (Sigma aldrich)

<sup>4)</sup> TiO<sub>2</sub>(G): G-5 (Millenium)

<sup>5)</sup> TiO<sub>2</sub>(D): DT51 (Millenium)

**Table 4.** Results of arsenic adsorption with TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

	Freundlich isotherm			Langmuir isotherm			
	K <sub>f</sub>	1/n	R <sup>2</sup>	q <sub>m</sub>	b	R <sup>2</sup>	R <sub>L</sub>
TiO <sub>2</sub>	23.83	0.797	0.887	69.44	0.867	0.761	0.460
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20.58	0.736	0.968	8.40	8.322	0.969	0.285

3.3. TiO<sub>2</sub> 금속산화물의 물리·화학적 특성평가

금속산화물 중 비소흡착 효율이 가장 우수한 TiO<sub>2</sub>의 물리·화학적 특성을 평가하기 위해 O/Ti ratio, Crystalline size 및 Specific surface area 분석하였다. Table 5에 나타난 바와 같이 상용 TiO<sub>2</sub> 금속산화물의 물리적 특성을 평가한 결과 비흡착량(Table 2)과 관계를 고려해 볼 때 큰 상관관계를 갖지 않는 것으로 나타났다. Specific surface area은 TiO<sub>2</sub> (G)가 344 m<sup>2</sup>/g으로 가장 큰 비표면적을 갖는 것으로 나타났으나, 흡착량은 1.74 mg/g로 다섯 개의 상용 TiO<sub>2</sub> 중 4 번째로 높은 비소 흡착을 보였다. 일반적으로 비표면적이 클수록 물리적 흡착이 원활히 이루어진다고 설명할 수 있으나, 본 실험결과에서는 물리적 특성과 흡착능성이 큰 상관성을 보이지 않는 것으로 확인되었다.

**Table 5.** Characteristic of physical and chemical with TiO<sub>2</sub>

Parameter	O/Ti ratio	Crystalline size (nm)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)
TiO <sub>2</sub> (P)	1.83	25	43
TiO <sub>2</sub> (U)	1.32	155.5	288
TiO <sub>2</sub> (A)	2.16	419	11
TiO <sub>2</sub> (G)	1.88	83.7	344
TiO <sub>2</sub> (D)	1.47	76.65	76

또한 TiO<sub>2</sub> 금속산화물의 비표면적과 흡착능의 상관성이 크지 않음을 동시에 고려한다면, 금속산화물의 O/Ti ratio, Crystalline size 및 비표면적은 비소흡착 성능에 영향을 미치는 인자가 아님을 확인하였다.

일반적으로 Langmuir 등온흡착 모델은 촉매반응의 속도식을 도출하거나 화학흡착을 이용하여 금속의 분산도를 측정하는데 많이 사용된다고 보고하고 있으며(Yang, 1987), Freundlich 등온흡착 모델에서 이온강도를 나타내는 1/n 값이 1일 경우 흡착량은 압력에 비례하고, 1보다 작을 경우 흡착량은 압력과 무관하므로 Langmuir 등온흡착 모델과 유사하다고 알려져 있다(Dubin, 1960). 이에 따라 본 연구결과를 종합적으로 고려해 볼 때 금속산화물을 이용한 비소흡착은 물리적 흡착이 아닌 화학적 성질에 의한 흡착인 것으로 판단된다. 또한 단순 비표면적에 의존하는 정전기적 인력이나 충돌반도가 비소흡착에 영향을 미치는 것이 아니라, 물질표면의 전자밀도 혹은 산세기 등 화학적 흡착 작용이 비소흡착에서 가장 중요한 인자가 될 수 있음을 시사한다.

4. Conclusion

본 연구에서는 지하수 내 비소 제거를 위한 금속산화물의 흡착 특성을 평가하기 위한 연구로 다양한 금속산화물

을 이용하여 비소흡착 효율 및 물리·화학적 특성과 등온이온식을 도출하고자 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 금속산화물을 이용한 비소흡착 효율을 평가한 결과 Titania (TiO<sub>2</sub>)와 Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)에서 비소흡착 효율이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 등온흡착식 비교를 통해 화학적 특성에 의한 흡착이 이루어진 것으로 판단된다.
- 2) 금속산화물을 이용한 비소흡착 특성의 경우 비표면적 및 격자 사이의 간격 크기 등 물리적 특성과 비흡착량과의 상관관계가 명확하지 않은 것으로 보아 화학적 특성에 의한 흡착으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 금속산화물을 이용한 비소흡착을 등온흡착 모델과 물리적 특성 평가로 확인하였으며, 화학적 특성에 의한 흡착임을 명확히 증명하기 위해서는 전자밀도 및 산세기 등의 분석이 추가되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 금속산화물의 적용에 따라 비소흡착 효율이 우수한 것으로 나타났으며, 향후 지하수 내 비소의 강화된 먹는 물 수질기준을 안정적으로 준수할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 경기녹색환경지원센터(2015년도 연구개발사업)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). *Division of Toxicology and Environmental Medicine*, CAS # 100-41-4, PUBLIC HEALTH STATEMENT. Atlanta, USA, pp. 1-2.

Ahn, J. S., Ko, K. S., Lee, J. S., and Kim, J. Y. (2005). Characteristics of Natural Arsenic Contamination in Groundwater and Its Occurrences, *Economic and Environmental Geology*, 38(5), pp. 547-561. [Korean Literature]

Dada, A. O., Olalekan, A. P., Olatunya, A. M., and Dada, O. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn<sup>2+</sup> Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk, *Journal of Applied Chemistry*, 3(1), pp. 38-45.

Dubin, M. M. (1960). The Potential Theory of Adsorption of Gases and Vapors for Adsorbents with Energetically Nonuniform Surfaces, *Chemical Reviews*, 60(2), pp. 235-241.

Fields, K. A., Chen, A., and Wang, L. (2000). *Arsenic Removal from Drinking Water by Coagulation/Filtration and Lime Softening Plants*, U.S. EPA.

Jeon, B. H., Kim, S. J., Lee, S. H., and Jung, W. S. (2008). Arsenic pollution of Soil and Groundwater, Removal Technology trends, *Mine Reclamation Corporation*, 2(1), pp. 3-13.

- [Korean Literature]
- Kosmulski, M. (2009). Compilation of PZC and IEP of sparingly soluble metal oxides and hydroxides from literature, *Advances in Colloid and Interface Science*, 152, pp. 14-25.
- Lee, J. J. (2014). Isotherms, Kinetics and Thermodynamic Parameters Studies of New Fuchsin Dye Adsorption on Granular Activated Carbon, *Applied Chemical Engineering*, 25(6), pp. 632-638.
- Ministry of Environment (MOE). (2005). *Mesoporous Media Iyonghan Pekwangsan Jubyen Oyemtoyang Junghwa Mich Junggumsok Oyem Jihasu Churikisul Gaebal*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Weber, J. and Miller, C. (1989). Organic Chemical Movement Over and Through Soil, Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soils, Sawhney, *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, pp. 305-334.
- Weber, T. W. and Chakravorti, R. K. (1974). Pore and Solid Diffusion Models for Fixed-Bed Adsorbers, *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 20(2), pp. 228-238.
- Won, S. H. and Lee, Y. C. (2007). Adsorption Behavior of p-Chloro phenol on Nonionic Polymeric Adsorbents: Adsorption Equilibrium Behavior and Evaluation for Adsorbability of Adsorbents, *Korean Journal EHS Assessment*, 5(4), pp. 13-23. [Korean Literature]
- World Health Organization (WHO). (2000). *World Health Report 2000*, Health Systems, Improving Performance, Geneva, World Health Organization.
- Yang, J. K., Yoo, D. H., Lee, S. I., Kown, H. K., Cho, J. H., and Sung, J. Y. (2003). Removal of Toxic As(3) by using Iron-Coated Sand, *Korean Society of Environmental Engineers Journal*, 5(1), pp. 450-457. [Korean Literature]
- Yang, R. T. (1987). *Gas Separation by Adsorption Processes*, Butterworth, Boston, pp. 39-45.
- Yoo, H. G., Lee, K. H., and Joo, H. J. (2015). A Study on the Characteristic of Iron Oxide Carrier for the Removal of Arsenic in Small Water Treatment Plant, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(2), pp. 209-215. [Korean Literature]